AUGUST WITKOWSKI

O ZASADZIE WZGLĘDNOŚCI

KRAKÓW
NAKŁADEM AKADEMII UMIEJĘTNOŚCI
ODBITO W DRUKARNI UNIWERSYTETU JAGIELLOŃSKIEGO
1909.

AUGUST WITKOWSKI +

O ZASADZIE WZGLĘDNOŚCI

KRAKÓW
NAKŁADEM AKADEMII UMIEJĘTNOŚCI
ODBITO W DRUKARNI UNIWERSYTETU JAGIELLOŃSKIEGO
1909.

Rzecz czytana na publicznem posiedzeniu Akad. Umiej. w dniu 22 maja 1909 r.

O zasadzie względności

napisał

August Witkowski.

Rzecz czytana na publicznem posiedzeniu Akademii Umiej. w dniu 22 maja 1909 r.

Stało się zwyczajem w ostatnich latach, że odczyty z zakresu fizyki, wygłaszane wobec szerszego grona słuchaczy, przybierają cechę hymnów, sławiących wiekopomne odkrycia i wynalazki, dokonane w ubiegłych dwu dziesiątkach lat. I nie dziw; zdobycze nauki tak doniosłe dla teoryi, a zarazem tak płodne w zastosowaniu praktycznem, jak fale elektromagnetyczne i telegrafowanie bez drutów, jak odkrycie elektronów i promienie Röntgena, jak rad i zdumiewające jego własności — pomijając wiele, wiele innych — budzą słuszne zaciekawienie szerokich kół i stanowiłyby wdzięczny temat odczytu.

Nie pójdę jednak tą drogą. Nie o tryumfach, lecz o troskach nauki zamierzam dziś mówić; o wytężonej pracy, zmierzającej do zdobycia harmonijnego poglądu na świat zjawisk; o rozpaczliwych usiłowaniach wyrwania się z kręgów sprzeczności, w jakie się popada, chcąc

pogłębić i pogodzić z sobą najprostsze nawet, najbardziej podstawowe pojęcia nauki. Walki te nie bywają na szczęście dla niej groźnemi; przeciwnie, one zapowiadają zazwyczaj doniosły zwrot, nowe rozszerzenie horyzontu myślowego.

Przedmiot, o którym zamierzam dziś mówić, odnosi się do prastarego problematu względności ludzkiego poznawania, a w szczególe do względności pojęć przestrzeni i czasu. Nie jest to temat nowy. Od początku rozwoju nauk ścisłych i filozoficznych rozbierany, albo, żeby lepiej powiedzieć, ostrożnie omijany, wystąpił obecnie na plan pierwszy rozważań teoretycznych. Wystąpił z taką siłą, że nie omijać go, ale stanowczo, oko w oko, rozprawić się z nim należało. Okazało się raz jeszcze, że i w zakresie zjawisk fizycznych, tajemniczy absolut osłoniony jest szczelnie i wszechstronnie szrankami względności.

Ażeby doprowadzić Szanownych Słuchaczy najkrótszą drogą do środka subtelnych rozważań, któremi mamy dziś się zajmować, pozwolę sobie rozpocząć od prostego przykładu. Proszę o wyobrażenie sobie zamkniętego pocisku, albo wagonu, rzuconego w pustą przestrzeń wszechświata, lecącego w linii prostej, z prędkością doskonale jednostajną. Przyjmijmy, że wagon ten posiada załogę, złożoną z badaczów przyrody, uzbrojonych we wszelkie, do ścisłych spostrzeżeń potrzebne narzędzia naukowe — załogę, której zadaniem będzie sprawdzić, czy i o ile ruch tej pędzącej w przestrzeni pracowni naukowej wywiera wpływ jakikolwiek na przebieg zjawisk fizycznych, które odbywają się w jej wnętrzu. Inaczej mówiąc, postawmy sobie proste pytanie, czy

z rodzaju i przebiegu zjawisk fizycznych badacze owi zdolni będą poznać, że poruszają się w przestrzeni, w jakim kierunku lecą i jak szybko.

Przykład, który tu wybrałem, nie jest zresztą tak fantastyczny, jakby się zdawało. Nie zapominajmy przecież, że wszystkie nasze pracownie naukowe, że sala, w której obecnie się znajdujemy, związane trwale z kulą ziemską, unoszone są przez nią dokoła słońca z zawrotną prędkością 4 mil w sekundzie, z prędkością, która dorównywa dziesięciotysięcznej części prędkości rozchodzenia się światła. Ruch ziemi dokoła słońca nie jest, co prawda, dokładnie prostolinijny, ani ściśle jednostajny, jakiego nam potrzeba do naszych rozważań. Jednakże, zamknięty okręg, jaki ziemia zatacza dokoła słońca, ma rozmiary tak olbrzymie, że przez dobrą chwilę nie dostrzegłoby się zmiany kierunku, ani prędkości ruchu naszej pędzącej w przestrzeni pracowni.

Ktokolwiek przywykł zwracać uwagę na to, co się około niego dzieje, w otaczającym świecie materyi, nie będzie miał wątpliwości, jak wypadnie odpowiedź owych badaczy na postawione wyżej pytanie. Czy sam fakt posuwania się układu ciał w przestrzeni ma wpływ, i czy może mieć wpływ, na rozgrywające się między temi ciałami zjawiska fizyczne, o tem może sądzić każdy, kto zwrócił uwagę choćby na zachowanie się przedmiotów w wagonie kolejowym, podczas jazdy po torze prostym, ruchem jednostajnym. Wiadomo dobrze, że w obrębie poruszającego się wagonu wszystko dzieje się tak samo, jak się dziać zwykło, przypuśćmy, w nieruchomym pokoju. Wtedy tylko, gdy ruch wozu staje się niejednostajnym, np. w chwili nagłego zahamowania pociągu,

zaczynają dziać się rzeczy niezwykłe: pakunki spadają z półek, jak gdyby strącone niewidzialną ręką i t. p.

Zresztą jest to rzeczą niemal oczywistą a priori, że spólny, jednostajny ruch w przestrzeni, jakkolwiekby on był szybki, nie może mieć wpływu na przebieg zjawisk fizycznych, wśród poruszających się ciał. Zważmy bowiem, że załoga pędzącej w przestrzeni pracowni fizycznej, odcięta od reszty świata, nie byłaby zgoła świadomą swego ruchu. Wszakże przestrzeń pusta jest doskonale jednostajna; niema w niej ani znaków przydrożnych, ani kamieni milowych, po których jedna jej część dałaby się odróżnić od innych. Istotnie też, podróżnik na statku, poruszającym się szybko, cicho, a jednostajnie po rzece, albo po jeziorze, nie odczuwa bynajmniej swego ruchu; nie byłby nawet zdolny ocenić, bez pomocy refleksyi i poprzednich przeżyć, czy sam mknie naprzód, czy też wybrzeża rzeki uciekają wstecz.

Wszystko to są rzeczy doskonale znane i rozumiane od bardzo dawna. Są to te właśnie spostrzeżenia i rozważania, które od początków racyonalnej filozofii przyrody kazały wykreślić z nauki pojęcie bezwzględnego ruchu w przestrzeni, jako pojęcie puste, jako wyraz bez treści.

Pomimo jednak, że zajmuję czas i uwagę Szanownych Słuchaczy stosunkami tak prostymi, tak bardzo elementarnymi, nie zawadzi jednak uprzytomnić sobie, na paru przykładach, jakie spostrzeżenia uczynią badacze nasi w ruchomej pracowni, albo raczej, czego oni nie dostrzegą.

Owoż naprzód, nie dostrzegą oni żadnej zmiany w rozmiarach, ani w geometrycznem ustosunkowaniu

otaczających przedmiotów. Nie dowodzi to zresztą. żeby zmian takich wcale nie było. Gdyby one nawet zachodziły, ale w taki sposób, iżby wszystkie przedmioty były równomiernie niemi dotknięte, łącznie z ciałami samych obserwatorów, łącznie z podziałkami, używanemi do mierzenia — byłyby widocznie niepoznawalne.

Nie dostrzegą oni też żadnej zmiany w stosunkach czasu. Gdyby n. p. struna na skrzypcach była nastrojona do pewnej częstości drgań w sekundzie, przed rozpoczęciem ruchu, według zegarka nieruchomego, częstość jej drgania, zmierzona podczas podróży, zegarkiem spólnie się poruszającym, okazałaby się niezmienionią. Nie dowodzi to znowuż, żeby zmian podobnych nie było wcale. Gdyby one nawet zachodziły, ale w taki sposób, iżby wszelkie stosunki czasu były równomiernie zmienione, łącznie z rytmem wahadła zegarowego, łącznie z tętnem serca samego obserwatora — byłyby widocznie niepoznawalne.

Jeszcze jeden przykład. Wyobraźmy sobie w naszym pędzącym wagonie dwu graczy w bilard. Jeden z nich trąca kulę podłużnie, w kierunku ruchu wagonu; drugi czyni to samo w kierunku wprost przeciwnym. Nie znaczy to nic, że pierwszą, zdawałoby się, unosi ruch wozu, drugiej się przeciwi; obie biedz będą na stole dokładnie jednakowo. Nie dostrzeże się najmniejszej różnicy biegu, która mogłaby zdradzić, że wagon jest w ruchu.

Wszystko to jest zupełnie jasne i proste, zgodne z pojęciem ruchu, jako objawu na wskróś względnego i zgodne z poglądem doskonałej jednostajności i jednorodności przestrzeni. Trudności zaczną się dopiero, gdy

od ruchów materyi zwrócimy się do tych objawów fizycznych, które według utartego poglądu, mają siedlisko swe w t. zw. eterze powszechnym: do objawów elektrycznych i optycznych. Gdyby nasi podróżni, zamiast kul bilardowych, ciskali ku sobie promienie światła, czy i wtedy ruch tych promieni byłby zgoła niezależny od ruchu wozu? Czy promień światła puszczony w tym kierunku, w którym kula ziemska właśnie się porusza, idzie prędzej, czy wolniej, od promienia przeciwnego?

Sprawa ta wymaga dokładniejszej rozwagi. Gdy w pamiętnym w dziejach filozofii przyrody roku 1675 Olaf Römer odkrył skończoną prędkość rozchodzenia się promieni świetlnych, należało rozstać się z naiwnym poglądem, jakoby zjawiska działy się w tejże właśnie chwili, gdy je dostrzegamy. Światło biegnie od słońca do ziemi minut 8, a w przeciągu jednej sekundy przebywa drogę 40.000 mil. Na odległościach ziemskich, choćby największych, spóźnienie, wynikające stąd, jest istotnie drobne, niedostrzegalne. Wszelako na odległościach niebieskich dosięgać ono może całych dni, lat, a nawet stuleci. Wiadomo np., że od czasu do czasu astronomowie zapisują zjawisko pojawienia się nowej gwiazdy na niebie. Świecąc żywym blaskiem przez kilka tygodni, albo miesięcy, gwiazda taka przygasa stopniowo, często znika niemal bez śladu. Wszelkie dane przemawiają za tem, że ciche to i łagodne zjawisko jest tylko sygnałem optycznym nieopisanej grozy kataklizmu, zderzenia się dwu światów, dwu wygasłych brył niebieskich. Otóż chwila, gdyśmy dostrzegli nową gwiazdę, będzie zawsze odległa od chwili jej narodzin o dziesiątki, albo

setki lat. Wszakże astronomowie liczą odległość gwiazd na lata światła.

Odkrycie tak niezmiernej wagi, jak to, które uczynił Römer, musiało, rzecz prosta, rozpocząć nową epokę w rozwoju nauki. Od tej chwili poczynają kształtować się teorye zjawisk świetlnych: „Światło jest czemś materyalnem, co leci przez próżnię z prędkością 40.000 mil w sekundzie“, to była pierwsza myśl teoretyczna, której hołdował Newton i jego następcy, aż do niedawnych stosunkowo czasów. Nie ostała się jednak w nauce, nie okazała się zdolną ogarnąć całej różnorodności zjawisk świetlnych. Musiała też ustąpić miejsca innej formule: „Światło jest czemś, co rozchodzi się w ośrodku przewodzącym je, na podobieństwo fali“. Ta formuła druga stanowi też istotnie rdzeń panującej po dziś dzień w nauce t. zw. undulacyjnej teoryi światła. Jedna z najpiękniejszych i najdoskonalszych, jakie fizyka teoretyczna stworzyła, teorya ta opierała się od początku na pewnej hipotezie niezmiernie śmiałej, a doniosłej. Należało przecież znaleźć jakieś podłoże, czyli ośrodek, dla tych fal, których bieg stanowić miał bieg światła, które trafiając nerw nasz wzrokowy, dają nam wrażenie jasności. Wtedy powstała też koncepcya substancyi niezmiernie subtelnej, nieważkiej, zalegającej cały wszechświat, zdolnej przewodzić drgania świetlne z prędkością 40.000 mil w sekundzie — koncepcya t. zw. eteru powszechnego.

Przez chwilę mogło się wówczas zdawać, że pojęcie ruchu bezwzględnego może być przecież w pewnej mierze utrzymane — ruchu nie w odniesieniu do przestrzeni, gdyż przestrzeni pustej nie było już odtąd nigdzie, lecz w odniesieniu do oceanu eterowego, zalegającego cały

jej bezmiar. Moglibyśmy wtedy, wracając do naszego przykładu, porównać rzuconą w przestrzeń pracownię fizyczną do statku na bezbrzeżnym oceanie. Nie dostrzegłby on, co prawda, własnego ruchu w przestrzeni, aleć przepływa niezawodnie przez coraz to inne cząstki wody; możnaby tedy mówić o ruchu statku względem wody, a podobnież o ruchu np. kuli ziemskiej względem eteru.

Sofistyczność takiego wykładu jest jednak aż nadto widoczna. O ruchu materyi względem eteru możnaby mówić słusznie wtedy tylko, gdyby substancya ta obecność swą w przestrzeni czemśkolwiek jeszcze zdradzała; gdyby było można jakkolwiek jedną jej część od drugiej odróżnić, słowem, gdyby ona była czemś więcej, jak plenum włożonem w pustkę po to tylko, żeby fale świetlne miały w czem się poruszać. Nie trzeba też było długo czekać, żeby doświadczenie zadało kłam wszelkim próbom podstawienia eteru zamiast przestrzeni.

Przypuszczam istotnie, że jeden z obserwatorów ruchomej pracowni puszcza promień światła wzdłuż wozu, od tylnej ku przedniej jego ścianie, w tę stronę zatem, w którą wóz jednocześnie pędzi. Z chwilą, gdy promień opuści swe źródło, przestanie niejako należeć do układu ruchomego, zawiśnie w eterze i biedz w nim będzie z prędkością 40.000 mil w sekundzie, niezależnie od ruchu wozu, dopóki nie dopadnie przedniej jego ściany. Ależ wóz umyka przed światłem z pewną prędkością. Widoczna tedy, że przelot promienia przez wóz ruchomy trwaćby powinien cokolwiek dłużej, aniżeliby trwał w wozie względem eteru nieruchomym. Przeciwnie znowu, promień światła puszczony w przeciwnym kierunku, od

przedniej ku tylnej ścianie wozu, powinienby przebiegać swą drogę w czasie krótszym, gdyż ściana tylna idzie naprzeciw niego.

Otóż mielibyśmy gotową metodę sprawdzenia, czy statek nasz na bezbrzeżnym oceanie eteru leży nieruchomy, czy płynie naprzód, w jakim kierunku i jak szybko płynie.

Dwaj uczeni amerykańscy, Michelson i Morley, przed dwudziestu dwu laty mieli istotnie odwagę podjąć się wykonania takiego experimentum crucis, nie na statku wprawdzie, ani na wozie, lecz na kuli ziemskiej, lecącej w przestrzeni z ogromną szybkością. Należało puścić promień światła w tę stronę, w którą odbywa się właśnie ruch ziemi, drugi w kierunku przeciwnym. Gdyby się okazało, że ten odbywa swą drogę w czasie krótszym, niż pierwszy, ruch ziemi względem eteru byłby wykazany.

Nie tu miejsce wchodzić w szczegóły tego głośnego doświadczenia. Wystarczy wiedzieć, że uczonym Amerykanom udało się porównać niezmiernie dokładnie czasy przebiegu promieni, idących naprzód i wstecz, z czasem przebiegu promienia poprzecznego, puszczonego w kierunku prostopadłym do linii ruchu kuli ziemskiej. Każdy nieuprzedzony, nie oplątany teoryami eteru, byłby wynik tego pomiaru z góry przewidział. Wynik ten był rzeczywiście ujemny. Okazało się, że czasy przebiegu promieni nie zależały wcale od oryentacyi przyrządu względem stron świata. Objawy dostrzegane, na podstawie których porównywano te czasy, a były niemi prążki interferencyjne, nie zmieniały się zgoła, czy ustawiono

oś przyrządu w kierunku ruchu kuli ziemskiej, czy jakkolwiek inaczej.

Stanęliśmy tedy wobec nierozwikłanej sprzeczności. Teorya fal eterowych, kształtowana na wzór i podobieństwo teoryi fal głosowych, wypróbowana na niezliczonych zjawiskach świetlnych, kusi nas do pogodzenia się z ideą ruchu bezwzględnego — gdyż takim, a nie innym byłby w gruncie rzeczy ruch względem eteru. Doświadczenie atoli przeciwstawia tym pokusom stanowcze veto. Możnaby wprawdzie ominąć trudność, sprawioną przez ujemny wynik doświadczeń Michelsona i Morleya. Wystarczyłoby przyjąć, że oś użytego przez nich przyrządu stawała się, sama przez się, odrobinę krótszą, za każdym razem, gdy ją zwracano w stronę ruchu ziemi. W tem założeniu wyrównywanie się czasów przebiegu promieni, idących podłużnie i poprzecznie, byłoby istotnie możliwe. Wystarczyłoby w tym celu skracanie się osi przyrządu o mniej, niż jednę stumilionową część jej długości. Łatwo to sprawdzić, skoro się uwzględni, że prędkość ruchu ziemi równa się jednej dziesięciotysięcznej części prędkości światła. Głośny uczony holenderski Lorentz, któremu zawdzięczamy tę bystrą uwagę, wygłosił istotnie hipotezę, że wszelka bryła, poruszająca się w eterze, zwęża się, czy skraca zawsze, sama przez się, w tym właśnie rozmiarze, który jest równoległy do kierunku jej ruchu — skraca się tem więcej, im prędzej się porusza. W myśl tej hipotezy kula ziemska, odpowiednio do swej prędkości, stawałaby się o 6 centymetrów węższą w kierunku średnicy wskazującej linię jej biegu. W tym samym stosunku zwężałyby się wszystkie przedmioty unoszone przez ziemię. Nikt nie dostrzegłby zre-

sztą tej zmiany, nie tylko dlatego, że jest niesłychanie drobna, ale i dla tej przyczyny, że wszelkie podziałki, używane do mierzenia, skracałyby się w tym stosunku, jak cała ziemia, w stosunku, który nazywać tu będziemy „stosunkiem Lorentza“.

Trudno zaprzeczyć, że pomysł Lorentza, jakkolwiek mógłby wybawić nas chwilowo z trudności, posiada wyraźne cechy hipotezy, ukutej ad hoc, luźnej i niezwiązanej z całokształtem naszej wiedzy przyrodniczej. Była też ta hipoteza zawsze przyjmowana z pewnem niedowierzaniem i nie zadawalała w gruncie rzeczy nikogo. Nie zadawalała ona też widocznie i samego Lorentza, gdyż od niego właśnie wyszedł impuls do nowego zwrotu w nauce, do postawienia całej zajmującej nas sprawy na zgoła odmiennej podstawie. Zwrot ten, sięgający doniosłością swoją daleko poza obręb rozważań, które mu dały początek, wkracza tak głęboko w najistotniejsze zagadnienia metafizyki i teoryi poznawania, że mając wybrać przedmiot dzisiejszego odczytu, nie wahałem się podjąć tego tematu, jakkolwiek jest trudny, zawiły i ledwo rozpoczęty. Mam bowiem silne przekonanie, że poruszone tu myśli wskazywać będą kierunek przyszłego rozwoju filozofii przyrody na długie lata.

Wobec nieudałych prób wykazania ruchu ziemi na podstawie zjawisk optycznych — a należy dodać, że obok doświadczeń Michelsona i Morleya, próby takie były wielokrotnie podejmowane przez innych, i to nie tylko na drodze optycznej, lecz także elektrycznej — należało postawić sobie pytanie, która z zasad posiada wyższą dla nauki cenę, zasada substancyalnego eteru, czyli też zasada przecząca możliwości wykrycia ruchu

bezwzględnego; która z nich posiada wyższy stopień oczywistości i wybitniejsze znamiona naukowego pewnika. Wybór nie mógł być wątpliwy. Skorośmy zgodzili się tak łatwo na wniosek, że zjawiska ruchu ciał materyalnych w obrębie wozu pędzącego jednostajnie, w linii prostej, nie zależą wcale od ruchu tego wozu, i nawzajem, że one żadną miarą nie są zdolne o ruchu takim zaświadczyć, uczyńmy bez wahania się krok następny. Powiedzmy: Żaden objaw fizyczny, dotyczący czy to materyi, czy światła lub ciepła, czy elektryczności lub magnetyzmu, nie może zależeć od spólnego ruchu, jakiby ciała, biorące udział w zjawisku, wykonywały jednostajnie w przestrzeni; nawzajem też, żaden objaw fizyczny, nie wyłączając tych, które przypisujemy spółdziałaniu eteru, nie może o ruchu takim świadczyć. Obserwator, biorący również udział w tym ruchu wspólnym, dostrzegać będzie zawsze taki przebieg zjawisk, jakiby mu się przedstawił, gdyby on sam był nieruchomy, a cały otaczający go układ materyalny nie zmieniał również położenia swego w przestrzeni. Nie wynika stąd oczywiście, żeby spostrzeżenia innego obserwatora, nie należącego do składu poruszającej się pracowni, były koniecznie zgodne ze spostrzeżeniami tamtego; obaczymy niebawem, że one nie będą istotnie zgodnemi.

Zgodziwszy się na określone właśnie stanowisko, musimy żądać, żeby mu się podporządkowywały wszelkie teorye i hipotezy naukowe. Za niedopuszczalną winniśmy uważać odtąd każdą teoryę, któraby mogła wskazywać drogę do wykrycia ruchu bezwzględnego, choćby w najdalszych swych konsekwencyach. Wygłoszona właśnie zasada staje się zatem zasadą kierowniczą wszelkich

rozważań przyrodniczych. W tem rozumieniu dano jej nazwę zasady, albo lepiej, postulatu względności. Do wygłoszenia jej w całej ogólności utorowały drogę badania Lorentza; najdobitniej i najogólniej wygłosił ją przed trzema laty szwajcarski uczony Einstein.

Przyjęcie tej zasady narzuca się nam z niezwykłą siłą, z siłą, której dorównywa przeświadczenie, że odrzuciwszy ją, doszlibyśmy do wniosków, zostających w rażącej sprzeczności z najgłębszą naszą i najbardziej wrodzoną wiedzą o świecie fizycznym. Zasadę tę należy zatem uważać za pewnik. Owoż, jeżeli rozbierzemy ściśle konsekwencye, do których ona prowadzi, wyjdzie na jaw osobliwy wniosek, że zasada względności obala cały szereg innych prawd, które przywykliśmy również za pewniki uważać. Okaże się, że bardzo istotne znamiona, przywiązywane intuicyjnie do pojęć czasu i przestrzeni, wymagać będą gruntownego przeobrażenia, żeby dały się z tą zasadą pogodzić. Tej stronie naszego tematu musimy poświęcić baczniejszą uwagę.

Pierwsze padnie ofiarą proste i niewzruszone, zdawałoby się, pojęcie spółczesności. Od czasów Römera wiedzieliśmy, że żadne zjawisko nie jest spółczesne z chwilą, kiedy je dostrzegamy. Przypominam przytoczony wyżej przykład gwiazd nowych. Nie o to jednakże tu chodzi. Spółczesność dwu zjawisk, zredukowanych już do prawdziwych swych epok, t. j. po uwzględnieniu czasu przebiegu światła, okaże się równie względną, jak względnym jest sam czas, albo przestrzeń. Jeśli np. powiemy, że ta lub owa gwiazda nowa pojawiła się w chwili śmierci Juliusza Cezara, to orzeczenie takie mieć będzie znaczenie określone tylko w stosunku do pewnego okre-

ślonego obserwatora, mającego pewien określony ruch względem tych miejsc, gdzie wspomniane dwa zdarzenia się przytrafiły. Inny obserwator, znajdujący się, dajmy na to, za obrębem ziemi, na jakiej planecie, mającej ruch bardzo różny od ruchu ziemi, oceniałby zjawienie się tej gwiazdy jako spółczesne może z chwilą urodzin Ramsesa Wielkiego, albo Napoleona.

Ażeby uwydatnić konieczność tego osobliwego wniosku prostym przykładem, przyjmijmy, że sala, w której obecnie się znajdujemy, unoszona jest razem z kulą ziemską w kierunku swej dłuższej osi. Z punktu, leżącego dokładnie pośrodku sali, puśćmy jednocześnie dwa promienie światła, albo dwa telegramy bez drutu, ku obu jej ścianom; jeden ku przedniej, w kierunku ruchu ziemi, drugi ku tylnej, w kierunku przeciwnym. Zapomocą tych promieni zapalmy dwa sygnały optyczne u obu ścian, np. dwie lampy elektryczne. Nikt z obecnych w sali nie będzie wątpił, że oba te sygnały pojawiły się ściśle jednocześnie, jakkolwiek może nie dostrzeże ich jednocześnie, chyba, że znajduje się w jednakowej odległości od obu lamp. Domaga się tego zasada względności; zresztą doświadczenia Michelsona i Morleya pouczyły nas, że promienie światła rozchodzą się na ziemi z jednaką prędkością na wszystkie strony.

Jakże przedstawiłyby się te dwa zdarzenia obserwatorowi, znajdującemu się poza ziemią, np. na słońcu? W myśl tejże samej zasady dostrzeże on ruch obu promieni, tak, jak i my, jednakowo szybki w obie strony, z tą samą prędkością 40.000 mil w sekundzie, jaką i my dostrzegamy. Ponadto jednak dostrzeże on coś więcej, czego my nie widzimy. Ujrzy on, że sala ta

porusza się w przestrzeni, że przednia jej ściana umyka przed promieniem światła, a tylna biegnie naprzeciw światła. Rzecz prosta, że według jego oceny, sygnał optyczny u tylnej ściany pojawi się wcześniej, aniżeli u przedniej. Widać tedy, iż sama zmiana stanowiska obserwatora, przerzucenie go z jednego układu ruchomego w inny, zmienia natychmiast ocenę spółczesności. Wystarczyłoby przyjąć, że ziemia w swym ruchu, ocenianym ze słońca, umyka przed światłem z prędkością nie 40 mil, lecz z prędkością, dosięgającą bez mała prędkości światła, żeby chwilę zjawienia się drugiego sygnału — zawsze wedle oceny obserwatora słonecznego — opóźnić o całe wieki.

Weźmy inny jeszcze przykład. Nocą przejeżdża obok nas pociąg kolejowy. Służba zapala lampy jednocześnie we wszystkich wagonach. Posługuje się przytem zegarami, rozstawionymi w pociągu i regulowanymi tak, iżby wszystkie wskazywały jednocześnie ściśle tę samą godzinę. (Rzecz godna wzmianki, że tej zgodności zegarów nie możnaby sprawdzić przez przenoszenie ich z jednego wagonu do drugiego, gdyż ruch, jak widzieliśmy przed chwilą, zmienia stosunki spółczesności. Jedynym probierzem zgodności mogłyby być znowu tylko promienie światła). Owoż, obserwator, stojący nieruchomo obok plantu kolejowego, nie uzna bynajmniej oświetlenia okien wagonów za jednoczesne. Według jego oceny okna ostatniego wozu zajaśnieją wcześniej, aniżeli pierwszego. Gdyby go zapewniono, iż wszystkie wozy mają być oświetlone ściśle o tej samej godzinie, doszedłszy do wniosku, że zegary różnych wozów nie idą zgodnie. Każdy wóz, według jego rozumienia, miałby właściwy

sobie „czas lokalny"; najwcześniejszy w tylnym wozie, w przednim najpóźniejszy.

Jednakże nie tylko ocena godziny, lecz zarówno ocena szybkości biegu zegarów okaże się zależną od stanowiska obserwatora, od ruchu, w jakim on pozostaje względem zegara, czy też zegar względem niego. Ażeby to okazać, powołam się znowu na przykład, wzięty z astronomii i z akustyki. Jadąc szybko pociągiem kolejowym, można często zauważyć, że ton piszczałki, na lokomotywie stojącej nieruchomo na stacyi, wydaje się wysoki, dopóki się do niej zbliżamy; natomiast, skoro miniemy lokomotywę i zaczniemy oddalać się od niej, ton obniży się wyraźnie. Ciekawe to zjawisko dostrzegł pierwszy i wytłómaczył Doppler w r. 1842. Wyjaśnienie jest nader proste. Fale akustyczne, wywołane w powietrzu przez drganie piszczałki, lecą naprzeciw nas, dopóki zbliżamy się do tego źródła dźwięku; oddalając się natomiast, my uciekamy przed niemi. Skutek jest ten, że ucho nasze doznaje w pierwszym przypadku częstszych wstrząśnień, aniżeli w drugim; słyszy też wyższy ton.

Zupełnie podobny objaw dostrzeżemy i wtedy, gdy stojąc nieruchomo obok toru, wsłuchiwać się będziemy w ton lokomotywy przejeżdżającej szybko obok nas. Znowu podczas oddalania się lokomotywy ton obniży się cokolwiek. Biorąc jednak rzecz ilościowo, te dwa przypadki nie są dokładnie równoważne. Nie chodzi tu bowiem o ruch względny lokomotywy w stosunku do naszego ucha, lecz o to, czy ucho, czy lokomotywa porusza się względem powietrza, które samo jest nieruchomym przewodnikiem fal głosowych. Bardzo elementarny ra-

chunek przekonałby nas natychmiast, że zmiana wysokości tonu będzie cokolwiek inna, gdy ucho zbliża się, albo oddala od lokomotywy, aniżeli w tym przypadku, gdy lokomotywa się porusza, a ucho jest nieruchome. Ściśle tedy biorąc, po zmianie wysokości tonu możnaby rozpoznać, czy my się zbliżamy do lokomotywy, czy też ona do nas.

Taż sama zasada akustyczna Dopplera znalazła ważne i rozległe zastosowanie w optyce, a zwłaszcza w astronomii fizycznej. Wszakże światło rozchodzi się również falami; przeto znowu oko nasze, jeśli biegnie naprzeciw tym falom, będzie przez nie częściej trafiane, odczuje wrażenie barwy cokolwiek odmienne od tego, jakiegoby doznało, gdyby było nieruchome, albo gdyby umykało przed falami. W celu ścisłego określenia barwy uzbrajamy oko spektroskopem. Przyrząd ten również, o ile się zbliża albo oddala od źródła światła, powinien odczuwać zmianę barwy; istotnie też odczuwa. Są gwiazdy, na których płonie wodór, wydający światło, złożone z trzech, czy czterech odrębnych barw; tyleż linii kolorowych okazuje nam spektroskop, zwrócony ku takiej gwieździe. Owoż zupełnie podobne linie okazuje także wodór, palony na ziemi. Jednakże w świetle gwiazd linie te bywają odrobinę przesunięte, bądź to ku czerwonemu, bądź ku fiołkowemu końcowi widma. Astronomowie wiedzą, że w pierwszym razie odległość między ziemią a gwiazdą powiększa się, w drugim się pomniejsza. Można nawet obliczyć bardzo dokładnie, ile kilometrów zmiana ta wynosi w każdej sekundzie.

Szczegóły te nie obchodzą nas jednak w tej chwili; obchodzi nas raczej pytanie zasadnicze i arcyważne: czy

nie możnaby na tej drodze dociec, czy gwiazda oddala się od nas, czy też my oddalamy się od niej? Przykład akustyczny pouczył nas bowiem, że dostrzeżona zmiana częstości drgania nie jest bynajmniej jednakowa w tych dwu przypadkach. A jednak ona musi być ściśle jednakową; wymaga tego kategorycznie zasada względności. Wszakże nam nie wolno nawet postawić podobnego pytania: czy gwiazda oddala się od nas, czy też my oddalamy się od niej; byłoby to bowiem pytanie próżne! Jakże wybrnąć z tej sprzeczności? Jedno jedyne wyjście narzuca się nam z koniecznością. Oto drgająca cząsteczka wodoru, czy innego światła, oddalając się od nas, albo też zbliżając się ku nam, musi zwalniać rytm swego drgania, przez sam fakt ruchu; musi go zwalniać tem więcej, im prędzej się porusza. Na założenie takie, pomimo jego niezwykłości, musimy przystać, ono jedno bowiem, jak zaraz obaczymy, zdolne jest uratować zasadę względności.

Należy dodać, że zwolnienie rytmu drgających cząstek, jakiego zasada ta się domaga, zależy jedynie od szybkości ruchu, jaki źródło światła wykonywa względem nas; nie zależy bynajmniej od tego, czy drganie samo odbywa się szybko, czy wolno. Owoż taka cząstka drgająca — jest to zegar naturalny, bijący w pewnym określonym rytmie, zależnym od jego wewnętrznej budowy. Stąd wniosek, że nie tylko ten zegar naturalny, ale każdy zegar, czy chronometr, ilekroć zbliża się, albo oddala od nas, musi przedstawiać się nam tak, jak gdyby rytm jego był zwolniony — gwoli konieczności, nie mechanicznej bynajmniej, a logicznej.

Czy rytm ten zmienia się „na prawdę“ i dlaczego

się zmienia, byłoby to pytanie próżne, skoro doświadczenie nie mogłoby na nie odpowiedzieć. Obserwator, mający zegar taki w kieszeni, i poruszający się razem z nim, nie dostrzegłby tej zmiany wcale, gdyż przez fakt ruchu zmieniłyby się dla niego równomiernie wszelkie stosunki czasowe. Zmiana ta mieć będzie walor rzeczywisty tylko w ocenie obserwatora nieruchomego, t. j. takiego, który nie bierze udziału w ruchu zegara, czy też cząsteczki świecącego wodoru. O ile cząsteczka taka, albo zegar, oddziaływa nań jakkolwiek, oddziaływać będzie tak, jak gdyby rytm jej był w określonym stosunku zwolniony.

Widać natychmiast, że to osobliwe, ale nieuchronne założenie usuwa całkowicie sprzeczność, na jaką natrafiliśmy, postawiwszy pytanie, czy gwiazda oddala się od nas, czy też my od niej. Oczywiście będzie to zupełnie obojętne, gdyż żaden objaw, dostępny obserwacyi, nie zdoła rozstrzygnąć pomiędzy temi dwiema możliwościami. Jeżeli się nam podoba utrzymywać, że gwiazda się porusza, a my jesteśmy nieruchomi, wtedy światło od niej otrzymywane mieć będzie częstość drgania zwolnioną przez jej ruch. Jeśli natomiast powiemy, że gwiazda jest nieruchomą, a my oddalamy się od niej, albo zbliżamy ku niej, wtedy skutek dostrzeżony będzie dokładnie ten sam. Gwiazda przysyła nam wtedy swoje światło naturalne, ale za to my odliczamy częstość jego drgania na zegarze poruszającym się. Rytm zegara będzie jednakowoż zwolniony w tym samym właśnie stosunku, w jakim poprzednio zwolniony był rytm drgania gwiazdy. Prosty rachunek przekonałby nas, że to zwolnienie rytmu zegarów poruszających się, dzieje się w tym właśnie

stosunku, który nazwaliśmy wyżej „stosunkiem Lorentza“ [1]).

Na trzecią jeszcze konsekwencyę zasady względności chcę tu zwrócić uwagę, niemniej osobliwą od poprzednich. Objaśnię ją znowu przykładem. Pociąg kolejowy przejeżdża z wiadomą prędkością przez pewną długość toru, odznaczoną znakami milowymi. Podróżny, zaopatrzony w zegar, liczy sekundy i ocenia długość przebytej drogi według czasu jazdy. Jednakże zegar jego, jak się wyżej okazało, idzie wolniej, aniżeli zegar, tak samo zresztą urządzony, drugiego obserwatora, stojącego nieruchomo obok plantu kolejowego. Widoczna tedy, że dwie oceny tej samej długości, dokonane przez tych dwu obserwatorów, nie będą się zgadzały. Którego z nich uważać będziemy za nieruchomego, jest rzeczą obojętną; zasada względności nie dopuszcza przecież takiego odróżnienia. Jeżeli pierwszy z nich sądzić się będzie nieruchomym, wtedy umykający pod nim tor kolejowy wydawać się mu będzie skróconym; jeśli drugi, wtedy ten znowu oceniać będzie długość pociągu pędzącego jako krótszą, aniżeliby mu się przedstawiała w stanie spoczynku. Okazuje się tedy ogólnie, że każde ciało, poruszające się względem nas, wydawać się będzie skróconem w tym kierunku, w którym się porusza i to znowuż w stosunku Lorentza. W tym bowiem stosunku zmienia się ocena biegu zegarów [2]). Dzieje się tedy automatycznie, pod naciskiem konieczności logicznej, to właśnie, co Lorentz usiłował wprowadzić tytułem hipotezy.

---

[1]) Patrz przypis 1.

[2]) Patrz przypis 2.

Nie będę mnożył przykładów. Poprzestanę na tych trzech wnioskach, wypływających z zasady względności; a trzeba przyznać, że one są dość niezwykłe, żeby pobudzić do poważnych refleksyi. Za punkt wyjścia przyjęliśmy tę zasadę, rozumiejąc doskonale, że narzuca się ona nam z niezwalczoną siłą, jako aksyomat, nie dopuszczający dyskusyi. Stosując jednak do tej zasady kryterya ściśle logiczne, doszliśmy do wniosków, które, na pierwszy rzut oka przynajmniej, wydają się sprzecznymi ze wszystkiem, co wiedzieliśmy dotychczas o czasie i przestrzeni. Chcąc uniknąć głębokiej sprzeczności, jaką nastręcza pojęcie ruchu absolutnego, wpadliśmy w kolizyę z prawdami staremi, jak świat, a pewnemi, zdawałoby się, jak sama oczywistość.

Czy wolno jednakże dowierzać zawsze oczywistości? Jakże oczywistym wydaje się nam np. znany postulat Euklidesa, iż przez punkt dany można poprowadzić jedną tylko prostą równoległą do innej prostej! A jednak wiemy dobrze, że istnieją systemy geometryczne, nie posiłkujące się tym postulatem, a mimo to ścisłe i logiczne. Głęboki znawca geometryi i jej filozofii, Henryk Poincaré, uzasadnia wziętość geometryi Euklidesowej, w przeciwstawieniu do innych możliwych systemów geometrycznych, tem tylko, że jest nam ona najdogodniejszą, a przytem najprostszą; aksyomaty zaś geometryczne uważa za proste konwencyonalne umowy. Owóż, jak geometrya jest tylko teoryą, przystosowaną do ujęcia dostępnych nam faktów geometrycznych, tak też systemat określeń czasu i przestrzeni, oparty na zasadzie względności, uważać należy tylko jako teoryę, przystosowaną do ujęcia faktów fizycznych.

Każdy zapyta jednak niewątpliwie, czem się to dzieje, że dotychczasowe nasze przekonania o bezwzględnej wartości pojęcia spółczesności, o niezmienności miar czasu i tam dalej, odbiegają tak daleko od tego, w co każe nam wierzyć zasada względności. Odpowiedź jest prosta. W dotychczasowem doświadczeniu naszem nie spotykaliśmy się nigdy z faktami, któreby tym przekonaniom naszym przeczyły. Ukuliśmy tedy systemat teoretyczny, który wystarczał na dotychczasowe nasze potrzeby — ale może i powinien być zmieniony, skoro się okaże, że nie nadaje się już do ujęcia rozszerzonego zakresu naszych doświadczeń. Zasada względności i wypływające z niej wnioski stanowią znakomitą przestrogę, że nawyczkom myślenia nie należy przypisywać znaczenia aksyomatycznego, ani też uważać je jako niewzruszone, aprioryczne prawdy.

Ażeby stało się jaśniejszem, dlaczego pospolite nasze sądy, wiążące się z pojęciami czasu i przestrzeni, nie wprowadziły nas nigdy w kolizyę z doświadczeniem podam kilka liczb. Przytoczyłem poprzednio przykład dwu sygnałów optycznych, zapalonych jednocześnie na dwu końcach tej sali. Wspomniałem, że w myśl zasady względności, zdarzenia te, dla nas jednoczesne, nie byłyby jednoczesnemi dla obserwatora, nie biorącego udziału w ruchu ziemi. Rzeczywiście, obserwator znajdujący się np. na słońcu, oceniłby, że jeden z tych sygnałów wyprzedził drugi o ułamek sekundy, wynoszący jedność podzieloną przez sto miliardów! Przyjąłem w tym rachunku, że długość sali wynosi 30 metrów [1]).

---

[1]) Patrz przypis 3.

Liczba ta jest dostatecznie wymowną, a należy pamiętać, że ruch ziemi, względem słońca, przewyższa olbrzymio, co do prędkości, wszystkie ruchy, z jakiemi spotykamy się na ziemi. Nie ma tedy najmniejszej obawy, żeby zwyczajne nam oceny stosunków czasowych i przestrzennych stanęły kiedykolwiek w praktycznej sprzeczności z doświadczeniem. Jednakże nie chodzi tu o wielkość popełnianego błędu, chodzi o sprawę nierównie ważniejszą, o ściśle logiczną konstrukcyę teoryi naukowej i o doskonałe jej dostosowanie do faktów. Prędkość kuli ziemskiej względem słońca, 4 mile zaledwie w sekundzie, jest drobna wobec 40.000 mil, jakie w tymże czasie przebiega światło. Gdyby jednak obok kuli ziemskiej przeleciała kiedy jaka bryła kosmiczna z prędkością, powiedzmy, 38 albo 39 tysięcy mil w sekundzie, wydałaby się ona nam spłaszczoną, jak opłatek. Wierzę w to mocno, gdyż wierzę w trafność teoryi względności.

Nie jest zresztą beznadziejnem oczekiwanie, że i na ziemi spotkamy się kiedy ze zjawiskami, które mogłyby stanowić probierz teoryi względności, dostępny doświadczeniu. Wśród wielu nadzwyczajnych własności, jakie okazuje radium, ten dar wspaniały, którym p. Curie-Skłodowska obdarzyła świat naukowy, najważniejszą zapewne jest zdolność wyrzucania drobniutkich, naelektryzowanych ciałek, t. zw. elektronów. Niektóre z nich wylatają z atomów radu wolniej, inne prędzej; są jednak między niemi i takie, których prędkość dochodzi do 38 tysięcy mil w sekundzie, dorównywa tedy bez mała prędkości światła. W obecnej chwili jest to jedyny znany nam przykład ruchu tak szybkiego, że różnica między

dawnemi teoryami, a teoryą, opartą na zasadzie względności, mogłaby już zaważyć. Dotychczasowe doświadczenia nad temi subtelnemi zjawiskami zdają się przemawiać rzeczywiście za teoryą względności.

Nie mógłbym zakończyć dzisiejszego odczytu, nie poruszywszy bodaj krótko stosunku teoryi względności do teoryi eteru powszechnego. Przed paru laty miałem sposobność przedstawić z tego miejsca szczególne i pouczające dzieje tej hipotetycznej substancyi; jest to zarazem jedna z najciekawszych kart historyi rozwoju nauki samej. W pierwszych dziesiątkach ubiegłego stulecia optyka święciła prawdziwe tryumfy. Postawiwszy zasadę, że cząsteczki ciał świecących wykonywają niezmiernie szybkie drgania, które, udzielając się otaczającemu eterowi, rozchodzą się w nim sposobem falowania, optyka zdołała wyjaśnić w najdrobniejszych szczegółach najzawilsze zjawiska świetlne; przepowiadała nawet nowe, nieznane jeszcze oku ludzkiemu, kierowała odkryciami. Eter przedstawiano sobie w owej epoce w sposób grubo-materyalny, jako ciało bardzo wprawdzie subtelne, ale sprężyste i masowe, jak zwykła materya — zdolne przewodzić szybkie drgania, mniej więcej tak, jak powietrze przewodzi drgania dźwięczącej struny.

Przyszły następnie epokowe odkrycia z dziedziny elektromagnetyzmu. One utrwaliły tylko teoryę eteru gdyż ten sam ośrodek, zdolny przewodzić promienie światła, okazał się zarazem sposobnym do wytłumaczenia objawów elektromagnetycznych. Zmieniły się jednak, pod wpływem tych odkryć, zapatrywania na istotę drgań świetlnych w eterze. Zaprzestano wtedy uważać je jako bardzo szybkie ruchy cząstek eteru; unieruchomiono

eter, a drganie świetlne stało się szybką zmiennością jego stanu elektrycznego i magnetycznego. Istota teoryi falowej pozostała jednak nietkniętą; fale ruchu zamieniły się tylko na fale elektromagnetyczne.

Jakże to wszystko pogodzić z teoryą względności? Wyznaczam bieg promieni światła na ziemi i znajduję, że one poruszają się na wszystkie strony z jednaką prędkością 40.000 mil w sekundzie. Jednocześnie wykonywa ktoś podobne doświadczenie w pędzącym wagonie kolejowym, albo zgoła na innej jakiej planecie, poruszającej się całkiem inaczej, niż ziemia i znajduje znowu 40.000 mil na wszystkie strony. Widać tedy, że jeden eter przywiązany jest do kuli ziemskiej i leci z nią razem w przestrzeni, drugi eter wiezie z sobą podróżny w wagonie, trzeci, czwarty, dziesiąty przywiązane są do różnych ciał niebieskich, gdziekolwiek podobałoby się komu czynić doświadczenia nad ruchem światła. Dochodzimy widocznie do absurdu. Przekonywamy się dowodnie, że teorya substancyalnego eteru i teorya względności nie dadzą się pogodzić z sobą żadną miarą.

Ale teorya falowa światła jest niewątpliwie prawdziwą; mamy na to tysiączne dowody. Są zatem fale, ale niema podłoża, w któremby one się poruszały. Jakież pozostaje wyjście z tego dylemmatu?

Różne są drogi, któremi duch ludzki dochodzi do zrozumienia przyrody. Jedne polegają na spostrzeganiu faktów, drugie wiodą przez koncepcye teoretyczne, których zadaniem jest uszeregować i powiązać niezmierzoną mnogość zjawisk. Do rzędu tych drugich należą hipotezy naukowe, takie, jak hipoteza eteru. Eter był nam potrzebny dopóty, dopóki bez jakiejś nici przewodniej

bylibyśmy zbłądzili wśród lasu różnorodnych luźnych faktów. Skorośmy raz przejrzeli i zrozumieli ich związek, poprzestańmy na konkluzyi, że zjawiska świetlne przedstawiają się nam tak, jak gdyby polegały na ruchu fal, lecących z miejsca na miejsce z wiadomą ogromną szybkością. Nie pytajmy o więcej, gdyż nic nadto nie dowiemy się. Z szeregu bytów metafizycznych należy eter ostatecznie i stanowczo wykreślić. Nie zniknie on zresztą z nauki. Podręczniki optyki ciał nieruchomych nie zmienią się ani o jotę. Zachowają one eter, jak sądzę, na zawsze, wszelako tylko jako pojęcie raczej dydaktycznej natury, jako środek do uzmysłowienia, a nie do wytłumaczenia praw przyrody.

Tak tedy, w miarę swego rozwoju i pogłębienia, i nauka wyzbywa się złudzeń, a zdąża krokiem pewnym do swego celu: do utrwalenia wiary w rząd prawa w przyrodzie i do zrozumienia związku zjawisk. Cel zaprawdę godzien trudu.

Kraków, w lutym 1909.

PRZYPISY.

1) Źródło dźwięku wykonywające n drgań w sekundzie, oddalając się od ucha nieruchomego z prędkością v, przesyła nam liczbę

$$n' = \frac{n}{1 + \frac{v}{c}}$$

wstrząśnień w sekundzie, w czem c oznacza prędkość głosu w powietrzu nieruchomem. Jeśli natomiast ucho oddala się z tą prędko-

ścią v od nieruchomego źródła dźwięku, liczba wstrząśnień słyszanych będzie

$$n'' = n\left(1 - \frac{v}{c}\right).$$

Ażeby wyniki te przystosować do ruchu światła w próżni i pogodzić je z teoryą względności, przyjmijmy, że częstość n drgania źródła światła oddalającego się, albo zbliżającego się, z prędkością v do obserwatora (którego uważamy za nieruchomego) przedstawia się n. p. β razy zmniejszoną. Pierwszy wzór będzie wtedy:

$$n' = \frac{n}{\beta\left(1 + \frac{v}{c}\right)};$$

drugi natomiast:

$$n'' = \beta n\left(1 - \frac{v}{c}\right),$$

gdyż liczba n jest w tym przypadku mierzona zegarem, na którym sekunda wydaje się β razy dłuższą. Zasada względności wymaga, żeby było $n' = n''$, skąd wypada:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

jakąkolwiek byłaby liczba n.

2) Jeśli l oznacza długość odcinka toru, po którym pędzi pociąg kolejowy, z prędkością v, wiadomą zarówno podróżnym w pociągu, jak obserwatorowi stojącemu obok toru, wtedy obserwator ten obliczy tę długość według wzoru $l = vt$. Podróżny w pociągu oceni ją natomiast jako mniejszą:

$$l' = v \, . \, t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

gdyż zegar jego wybija tylko

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

sekund w czasie, gdy takiż zegar nieruchomy wybija jedną. Nawza-

... obserwator nieruchomy oceni długość pociągu jako mniejszą od ...j przez podróżnego, i to również w stosunku $1:\beta$.

3. Oz...czmy przez $2l$ długość sali zmierzoną na ziemi. Ze słońca ona byłaby ocenianą jako

$$2l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}.$$

Obserwator słoneczny obliczyłby czas t_1 przebiegu światła, ze środka, do przedniej ściamy, według wzoru

$$ct_1 = l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} + vt_1;$$

do tylnej natomiast według

$$ct_2 = l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} - vt_2.$$

Stąd różnica:

$$t_1 - t_2 = 2l \cdot \frac{v}{c^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$